Статья поступила в редакцию: 08.09.2026
Статья принята к публикации: 12.10.2026
Статья опубликована: 28.10.2026

УДК 622.8+532.5

Определение напорной характеристики вентиляционно-эжекторной системы на основе аналитического и численного моделирования

Нурхонов Хусан Алмирза угли
доц. кафедры
Геология и горное дело, Каршинский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Карши
E-mail: nurxonovxusan@gmail.com

Равшанов Аваз Али угли
учебно-курсовой комбинат, мастер производственного обучения, АО НГМК, Южное рудоуправление
Республика Узбекистан, г. Навои

Determination of pressure characteristics of a ventilation-ejector system based on analytical and numerical modeling

Nurkhonov Khusan Almirza ugli
Associate Professor
Department of Geology and Mining, Karshi State Technical University
Republic of Uzbekistan, Karshi

Ravshanov Avaz Ali ugli
master of Industrial Training, JSC NGMK, Southern Ore Management, Training and Coursework Combine
Republic of Uzbekistan, Navoi

Аннотация

В статье исследована напорная характеристика вентиляционно-эжекторной системы для горных выработок большого поперечного сечения. Рассмотрены ограничения существующих одномерных аналитических моделей эжекторов и обоснована необходимость применения трёхмерного численного моделирования воздушных потоков. Расчёты выполнены в программном комплексе ANSYS Fluent 17.1 на геометрической модели транспортного штрека длиной 200 м и площадью поперечного сечения 121 м² с вентилятором, соплом и камерой смешения. Проанализированы поля скорости и статического давления, расширение эжекторной струи, формирование циркуляционных зон и влияние расположения установки на аэродинамические параметры выработки. Установлено, что зона существенного воздействия эжекторного потока достигает примерно 150 м. Размещение камеры смешения на расстоянии 0–1 м от выходного сечения вентилятора обеспечивает эффективное

Библиографическое описание: Нурхонов Х.А.У., Равшанов А.А.У. Определение напорной характеристики вентиляционно-эжекторной системы на основе аналитического и численного моделирования // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. 2026. 10(151). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23551

использование кинетической энергии первичного потока. Отсутствие камеры снижает создаваемый напор примерно на 10 %. Наиболее эффективным является размещение эжекторной установки в центральной части поперечного сечения выработки, что позволяет повысить аэродинамический напор до 35 %, тогда как размещение у почвы обеспечивает увеличение до 20 %. Разработана процедура осреднения трёхмерных полей скорости и давления по поперечному сечению выработки, позволяющая получить эквивалентную напорную характеристику эжекторной установки в виде зависимости ΔP = f(Q) для использования в одномерных расчётах шахтных вентиляционных сетей. Полученные результаты могут использоваться для определения эквивалентной напорной характеристики эжекторной установки в расчётах шахтных вентиляционных сетей.

Abstract

The article investigates the pressure characteristic of a ventilation-ejector system for large-section underground mine workings. Limitations of existing one-dimensional analytical ejector models are considered, and the need for three-dimensional numerical airflow simulation is substantiated. Calculations were performed in ANSYS Fluent 17.1 using a 200 m transport drift with a cross-sectional area of 121 m², equipped with a fan, nozzle, and mixing chamber. Velocity and static-pressure fields, ejector-jet expansion, circulation zones, and unit-location effects on aerodynamic performance were analyzed. The significant influence zone of the ejector flow reaches approximately 150 m. Positioning the mixing chamber 0–1 m from the fan outlet effectively uses primary-airflow kinetic energy. Removing the mixing chamber reduces generated pressure by about 10 %. The most efficient arrangement is in the central part of the drift cross-section, increasing aerodynamic pressure by up to 35 %, while floor-level placement provides an increase of up to 20 %. A procedure for averaging three-dimensional velocity and pressure fields over the working cross-section has been developed, making it possible to obtain the equivalent pressure characteristic of the ejector unit as ΔP = f(Q) for use in one-dimensional mine ventilation network calculations. The results support determination of the equivalent pressure characteristic of ejector units in mine ventilation network calculations.

Ключевые слова: вентиляция шахт, рудничная вентиляция, вентиляционно-эжекторная система, эжекторная установка, вентилятор, камера смешения, воздушный поток, эжекционный поток, аэродинамический напор, напорная характеристика, аэродинамическое сопротивление, скорость воздушного потока, распределение давления, численное моделирование, трёхмерная модель, ANSYS Fluent, транспортный штрек, горная выработка.

Keywords: mine ventilation, underground mine ventilation, ventilation-ejector system, ejector unit, ventilation fan, mixing chamber, airflow, ejector airflow, aerodynamic pressure, pressure characteristic, aerodynamic resistance, airflow velocity, pressure distribution, numerical simulation, three-dimensional model, ANSYS Fluent, transport drift, underground mine working.

Введение

Теоретические основы рудничной вентиляции и процессов эжекции в подземных горных выработках заложены в фундаментальных работах И.И. Медведева, посвящённых аэрогазодинамике шахт и рудников [10]. Значительный вклад в развитие методов расчёта

вентиляторных эжекторных установок внесли Д.Н. Алыменко, Б.П. Казаков, А.В. Шалимов и Н.Н. Мохирев [1, 4, 9, 15]. Так, в работе Д.Н. Алыменко рассмотрены вопросы аэродинамики эжекторных установок и их работы в шахтных вентиляционных сетях, включая режимы работы в противонапоре с главной вентиляторной установкой [1]. Н.Н. Мохирев разработал аналитические зависимости для определения режимов работы вентиляторов-эжекторов, в том числе при параллельной работе нескольких установок в одном поперечном сечении выработки [15]. Б.П. Казаков и А.В. Шалимов уделили особое внимание математическому моделированию взаимодействия воздушных потоков при эжекции [9].

Вместе с тем анализ современных публикаций показывает, что существующие одномерные аналитические модели эжекции имеют ограниченную применимость в условиях горных выработок большого поперечного сечения. Как отмечается в работе А.А. Равшанова, Х.А. Нурхонова и соавторов, при малом аэродинамическом сопротивлении выработки точность аналитических моделей, основанных на законах сохранения энергии и импульса, существенно снижается [12, 21]. Это связано с тем, что в выработках большого сечения пространственная неравномерность поля скоростей и особенности расширения эжекторной струи не могут быть достаточно точно описаны одномерными моделями, предполагающими завершённость процесса смешения потоков.

В связи с этим всё большее распространение получают методы численного моделирования на основе трёхмерной расчётной области. В работах С.С. Кобылкина обоснована необходимость применения объёмного моделирования аэрогазодинамических процессов для расчёта параметров вентиляции шахт и показаны преимущества данного подхода перед традиционными одномерными схемами [5, 6, 16]. Н.О. Каледина и С.С. Кобылкин применили численное моделирование для решения задач обеспечения метанобезопасности горных работ [11]. В работах Д.Н. Алыменко и А.А. Иванова рассмотрены вопросы моделирования вентиляторных эжекторных установок и метода расчёта числа Рейнольдса потоков воздуха при эжекционном процессе [2]. Вместе с тем, несмотря на растущее число исследований в области численного моделирования рудничной вентиляции, вопросы определения эквивалентной напорной характеристики вентиляционно-эжекторных систем для последующего использования в одномерных расчётах шахтных вентиляционных сетей остаются недостаточно изученными.

Таким образом, анализ литературных источников показывает, что существующие аналитические модели эжекции имеют ограничения применительно к выработкам большого поперечного сечения, а методы численного моделирования не в полной мере адаптированы для получения эквивалентных напорных характеристик эжекторных установок. Это обусловливает необходимость проведения комплексного исследования, сочетающего аналитический и численный подходы.

Проветривание центральной части рудника «Зармитан» осуществляется нагнетательным способом по фланговой схеме. Проветривание очистных и подготовительных горных выработок обеспечивается главной вентиляторной установкой (ГВУ) и вентиляторами местного проветривания (ВМП). Свежий воздух вентиляторной установкой ВОД-30, размещённой у устья ствола «Главная», подаётся по стволу на горизонт 900 м и направляется на проветривание склада взрывчатых материалов и штольни

«Капитальная». Кроме того, свежий воздух поступает на горизонты 780, 720, 660, 600 и 540 м для проветривания очистных и подготовительных работ. На горизонт 840 м свежий воздух подаётся только для поддержания горных выработок. Необходимый расход свежего воздуха для проветривания штольни НТС горизонта 480 м поступает из квершлага «Северный» горизонта 600 м с помощью вентилятора местного проветривания. Отработанный воздух после проветривания рабочих зон направляется по вентиляционным восстающим (ВВ) и вентиляционно-ходовым восстающим (ВХВ) в выработки вышележащих горизонтов. Далее он удаляется в атмосферу через ствол «Вспомогательный», НТС 1–3 и отдельные погашенные выработки, имеющие аэродинамическую связь с земной поверхностью. В настоящее время главная вентиляторная установка ВОД-21М у устья ствола №3, предназначенная для проветривания НТС 1–3, исключена из схемы проветривания согласно плану ликвидации аварий. Поэтому проветривание НТС 1–3 осуществляется за счёт воздушных потоков, поступающих с горизонтов 540, 600, 660, 720 и 780 м.

Целью настоящей работы является определение эквивалентной напорной характеристики вентиляционно-эжекторной системы на основе аналитического и численного моделирования для условий транспортного штрека большого поперечного сечения. Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи: анализ ограничений существующих аналитических моделей эжекции; разработка трёхмерной геометрической модели транспортного штрека с вентиляционно-эжекторной установкой; численное исследование полей скорости и статического давления в ANSYS Fluent; оценка влияния расположения эжекторной установки на аэродинамические параметры выработки; разработка процедуры осреднения трёхмерных полей для получения эквивалентной напорной характеристики.

Материалы и методы

В горных выработках большого поперечного сечения, где требуется применение эжекторных установок, распределение скорости воздуха по площади сечения характеризуется значительной неравномерностью. Такая пространственная неоднородность осложняет теоретическое описание аэродинамических процессов вентиляционной сети. В этих условиях возможности классического подхода, основанного на расчёте воздухораспределения с помощью системы одномерных аэродинамических уравнений, сформулированных на основе законов Кирхгофа, ограничены [20]. Существующие аналитические модели, разработанные для расчёта явления эжекции [13], в рассматриваемых условиях имеют определённые ограничения. В частности, при использовании подходов, основанных на законе сохранения энергии [18], точность расчётов существенно снижается при малом аэродинамическом сопротивлении горной выработки. Кроме того, применение этих подходов в практических аэродинамических расчётах требует предварительного задания ряда параметров, определяемых экспериментально. Аналитические подходы, основанные на законе сохранения импульса [17], позволяют описывать формирование эжекторного потока лишь при определённых аэродинамических условиях. В частности, предполагается, что воздушная струя на выходе из эжектора достаточно расширилась по поперечному сечению выработки и процесс её формирования завершён. При разработке математических моделей эжекторных установок Б.П. Казаков и А.В. Шалимов уделяли особое внимание

взаимодействию воздушных потоков и аналитическому описанию процесса эжекции [9]. Однако в выработках большого поперечного сечения пространственная неравномерность скорости и особенности расширения эжекторной струи не во всех случаях могут быть достаточно точно описаны одномерными аналитическими моделями. Поэтому для оценки воздухораспределения в таких условиях целесообразно использовать методы численного моделирования на основе трёхмерной расчётной области. Вопросы численного моделирования сложных аэрогазодинамических процессов рудничной вентиляции также рассмотрены в исследованиях С.С. Кобылкина [5].

На рисунке 1 представлена расчётно-геометрическая модель транспортного штрека большого поперечного сечения, оборудованного вентиляционно-эжекторной установкой. Во входном сечении расчётной области в качестве граничных условий задаются массовый расход воздуха Qвх и статическое давление Рвх. В центральной части штрека размещены вентилятор, сопло и камера смешения. В данной зоне происходит взаимодействие первичного воздушного потока, создаваемого вентилятором, с вторичным потоком, вовлекаемым в движение за счёт эффекта эжекции, с последующим их смешением. Сформировавшийся объединённый воздушный поток далее перемещается по транспортному штреку в направлении выходного сечения расчётной области. На выходной границе задаётся условие по статическому давлению Рвых. Основными геометрическими параметрами модели являются длина штрека L, ширина B и высота H, определяющие размеры расчётной области. Разработанная геометрическая модель служит основой для численного исследования пространственного формирования воздушного потока, анализа распределения скоростей и статического давления, а также определения эквивалентной напорной характеристики вентиляционно-эжекторной системы.

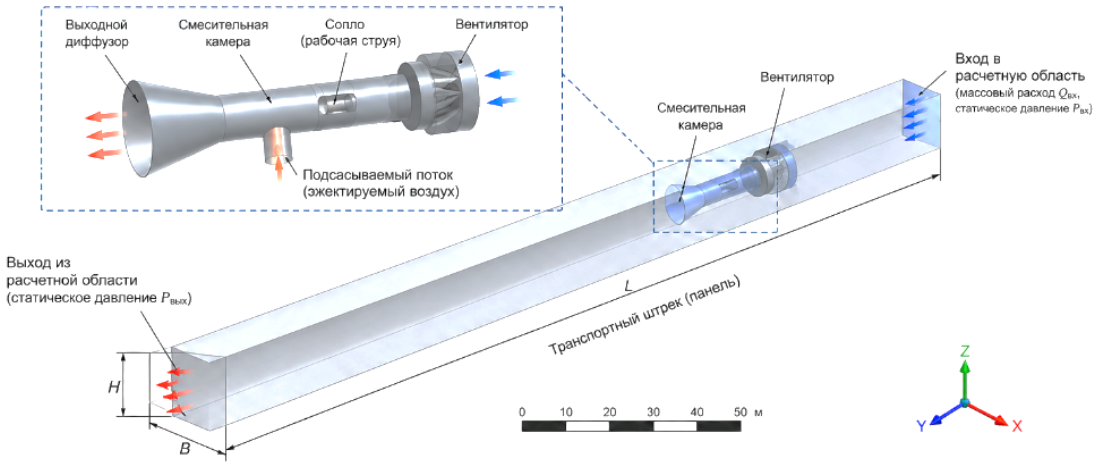

Рисунок 1. Геометрическая модель транспортного штрека с установленной эжекторной установкой и камерой смешения

Численные исследования воздушного потока выполнены в программном комплексе ANSYS Fluent 17.1. Для задания напорной характеристики вентилятора использовалась заводская аэродинамическая характеристика, аппроксимированная полиномом второй степени:

$$\Delta P = 2489 + 132,5V - 7,19V^2, \quad (1)$$

где ΔP — создаваемый вентилятором перепад статического давления, Па; V — скорость воздушного потока на выходе из вентилятора, м/с. Коэффициенты полинома имеют размерности: 2489 Па; 132,5 Па·с/м; 7,19 Па·с²/м². Формула справедлива в диапазоне скоростей V = 0…18 м/с, соответствующем паспортной рабочей зоне вентилятора. Выбор полиномиальной аппроксимации вместо стандартной формы $\Delta P = a - bQ^2$ обусловлен тем, что заводская характеристика вентилятора в исследуемом диапазоне расходов имеет ярко выраженный нелинейный вид с максимумом, который не описывается квадратичной зависимостью от расхода. При V ≈ 30 м/с формула даёт ΔP ≈ 0, что выходит за пределы рабочей зоны вентилятора и не используется в расчётах.

Влияние главной вентиляционной установки учитывалось путём задания фиксированного значения скорости потока на входной границе расчётной модели транспортного штрека.

Скорость воздуха на входе в выработку принята равной 0,2 м/с, что соответствует минимальному расходу воздуха, необходимому для поддержания проветривания выработки в период между сменами и при отсутствии активных горных работ. Это значение выбрано в качестве тестового режима для оценки влияния эжекторной установки в наиболее неблагоприятных условиях. Для проверки устойчивости результатов выполнены дополнительные расчёты при скоростях 1,0 и 2,0 м/с, соответствующих реальным режимам проветривания. Установлено, что качественная картина распределения скоростей и давления сохраняется, а количественное увеличение аэродинамического напора при центральном размещении установки составляет от 32 до 35 % в зависимости от входной скорости, что подтверждает применимость полученных закономерностей для широкого диапазона режимов проветривания.

Естественная шероховатость стенок горной выработки учитывалась введением дополнительного члена ΔB в функцию стенки [7, 8]:

$$u^+ = \frac{1}{k}\ln\left(Ey^+\right) - \Delta B; \tag{2}$$

$$\Delta B = \frac{1}{k}\ln\left(1 + \frac{K_s^+}{2}\right), \tag{3}$$

где: E=9,793, к=0,4 — константы модели; $y+=y_p u^*/\nu$ — безразмерное расстояние от стенки до центра пристеночной расчётной ячейки; $u+=u_p/u^*$ — безразмерная скорость в центре пристеночной ячейки; u* — скорость трения, м/с; ν — кинематическая вязкость воздуха, м²/с; y_p — физическое расстояние от стенки до центра пристеночной ячейки, м; u_p — физическая скорость воздушного потока в центре пристеночной ячейки, м/с.

Средняя высота шероховатости стенок выработки K_s была выбрана по результатам предварительных расчётов. Её значение принято соответствующим коэффициенту аэродинамического сопротивления α = 0,025 Н·с²/м⁴ (0,025 кг/м³), что соответствует горной выработке, пройденной буровзрывным способом. Связь между высотой выступов шероховатости $_{Ks}$ и коэффициентом аэродинамического сопротивления α устанавливалась на основе нормативного документа «Руководство по проектированию вентиляции угольных

шахт» (Макеевка-Донбасс, 1989) [14] и справочных данных для буровзрывного способа проходки. Для выработок большого поперечного сечения при K_s = 3 см и коэффициенте α = 0,025 Н·с²/м⁴ обеспечивается удовлетворительное согласование расчётных и экспериментальных данных по распределению скоростей. Размерность коэффициента аэродинамического сопротивления α = 0,025 Н·с²/м⁴ является общепринятой в рудничной аэродинамике и соответствует формуле

$$\Delta P = \alpha \cdot L \cdot P \cdot Q^2/S^3,$$

где L — длина выработки, P — периметр, S — площадь поперечного сечения, Q — расход воздуха.

Характерные размеры элементов расчётной области выбирались таким образом, чтобы минимизировать зависимость численных результатов от расчётной сетки (таблица 1). Это обеспечило практическую независимость полученного численного решения от плотности сетки.

Таблица 1. Основные параметры, принятые при численном моделировании

Параметр	Значение
Длина горной выработки, м	200
Площадь поперечного сечения горной выработки, м²	121
Высота горной выработки, м	11
Средняя шероховатость стенок горной выработки, см	3
Диаметр вентилятора, м	0,6
Диаметр камеры смешения, м	1,4
Длина камеры смешения, м	3
Расстояние от вентилятора до камеры смешения, м	1
Расстояние от вентилятора до боковой стенки выработки, м	1,6
Расстояние от вентилятора до почвы выработки, м	1,6
Скорость воздуха на входе в выработку, м/с	0,2
Интенсивность турбулентности входного воздушного потока, %	5

Как видно из рисунка 2, за эжекторной установкой вблизи кровли горной выработки формируется устойчивая циркуляционная вихревая зона. Её устойчивость поддерживается за счёт кинетической энергии эжектируемого воздушного потока.

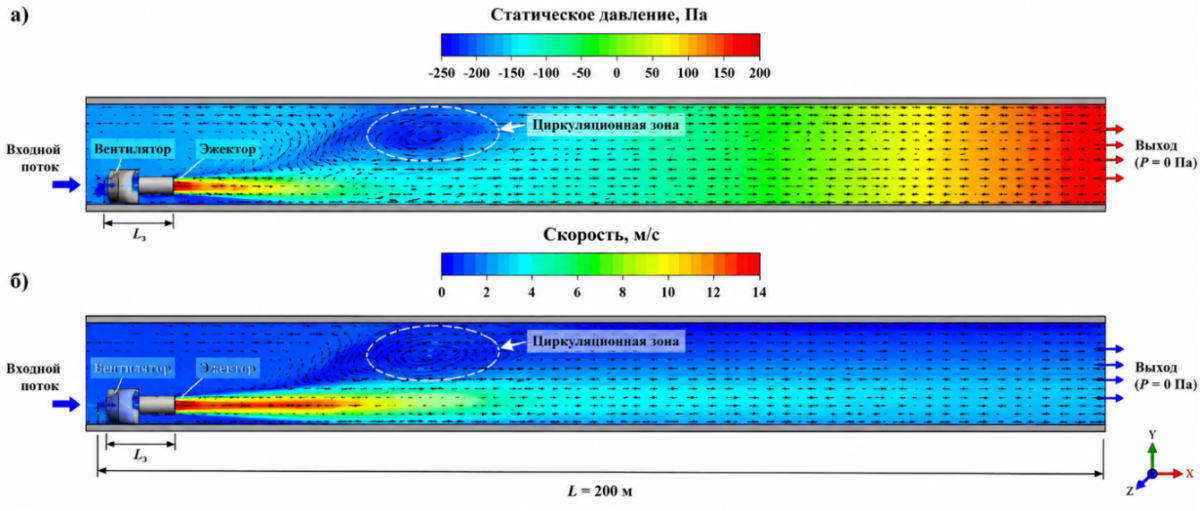

Рисунок 2. Распределение статического давления (а) и скорости воздушного потока (б) в среднем вертикальном продольном сечении транспортного штрека

Закономерности распределения полей скорости и давления, полученные в результате численного моделирования, в целом согласуются с результатами предыдущих численных исследований аэродинамических процессов эжекторных установок [19, 3]. Это подтверждает применимость принятой расчётной модели и граничных условий для описания формирования эжекторного потока в горной выработке.

Отдельно проанализирован процесс расширения воздушной струи, выходящей из эжектора, по поперечному сечению горной выработки (рис. 3). Для этого оценивалось распределение скорости воздуха в поперечных сечениях транспортного штрека, расположенных на различных расстояниях от камеры смешения. Такой анализ позволяет проследить переход от начальной высокоскоростной зоны эжекторной струи к её смешению с окружающим воздушным потоком.

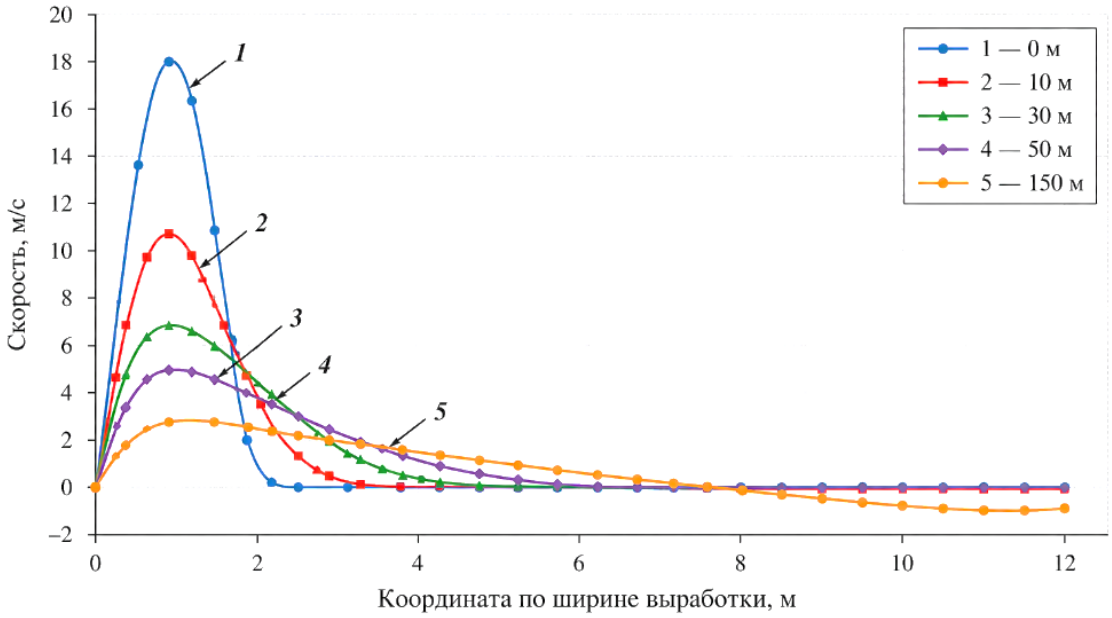

Рисунок 3. Распределение скоростей воздуха в поперечном сечении транспортного штрека при различном удалении от камеры смешения: 1 – 0 м, 2 – 10 м, 3 – 30 м, 4 – 50 м, 5 – 150 м

По оси абсцисс отложена координата по ширине выработки, м. Отсчёт ведётся от левой боковой стенки выработки (со стороны размещения эжекторной установки). Сечение смещено к боковой стенке выработки и проходит через ось вентилятора. Кривая 5 (150 м) показывает отрицательные значения скорости, что соответствует возвратному потоку. На графике возвратный поток обозначен штриховой линией.

Выбранное для анализа поперечное сечение смещено к боковой стенке выработки и проходит через ось вентилятора. Полученные результаты показывают, что динамический напор воздушной струи, создаваемой эжекторной установкой, в диапазоне 0–150 м за установкой оказывает существенное влияние на скорость движения воздуха во всех частях поперечного сечения выработки. В части выработки, противоположной стороне размещения эжекторной установки, наблюдается обратное движение воздушного потока. Максимальная скорость возвратного потока достигает 0,8 м/с.

В рамках исследования разработана численная модель, позволяющая определять аэродинамические параметры воздушного потока в трёхмерном пространстве горной выработки с эжекторной установкой, работающей в условиях отсутствия препятствий. Модель позволяет оценивать поля скорости и давления, взаимодействие воздушных потоков и особенности распространения эжекционной струи вдоль выработок большого поперечного сечения. Разработанная модель может применяться для определения эквивалентной напорной характеристики эжекторной установки в одномерных аэродинамических расчётах воздухораспределения шахтных вентиляционных сетей на основе первого и второго законов Кирхгофа.

Для получения эквивалентной напорной характеристики эжекторной установки в виде зависимости $\Delta P = f(Q)$ выполнена следующая процедура осреднения трёхмерных полей. В каждом поперечном сечении выработки, расположенном на расстоянии x от камеры смешения, вычислялись средние по площади значения статического давления $P_{ср}(x)$ и скорости $V_{ср}(x)$:

$$P_{\text{ср}}(x) = \frac{1}{S} \int_S P(x, y, z)\, dS \tag{4}$$

$$V_{\text{ср}}(x) = \frac{1}{S} \int_S V(x, y, z)\, dS \tag{5}$$

где S — площадь поперечного сечения выработки. Эквивалентный аэродинамический напор эжекторной установки определялся как разность средних статических давлений на выходе из камеры смешения и на входе в расчётную область:

$$\Delta P_{\text{экв}} = P_{\text{ср}}(x = 0) - P_{\text{ср}}(x = L) \tag{6}$$

Эквивалентный расход воздуха определялся как $Q = V_{ср} \cdot S$. По результатам расчётов для нескольких значений входной скорости (0,2; 1,0; 2,0 м/с) получена эквивалентная напорная характеристика эжекторной установки, аппроксимированная зависимостью:

$$\Delta P_{экв} = 1850 - 42,3Q + 0,87Q^2 \quad (7)$$

где $\Delta P_{экв}$ — эквивалентный напор, Па; Q — расход воздуха, м³/с. Формула справедлива в диапазоне расходов Q = 24…242 м³/с, соответствующем исследуемым режимам проветривания. Полученная зависимость может быть непосредственно использована в одномерных расчётах шахтных вентиляционных сетей для учёта влияния эжекторной установки.

На рисунке 4 представлена полученная эквивалентная напорная характеристика эжекторной установки в виде зависимости $\Delta P_{экв}$ = f(Q). Кривая построена по результатам численного моделирования для трёх значений входной скорости (0,2; 1,0; 2,0 м/с) и аппроксимирована полиномом второй степени (7). Характеристика имеет ниспадающий вид: с увеличением расхода воздуха Q эквивалентный напор $\Delta P_{экв}$ монотонно снижается, что качественно согласуется с типовыми напорными характеристиками вентиляторных установок. Полученная зависимость может быть непосредственно использована в одномерных расчётах шахтных вентиляционных сетей в качестве эквивалентной напорной характеристики эжекторной установки.

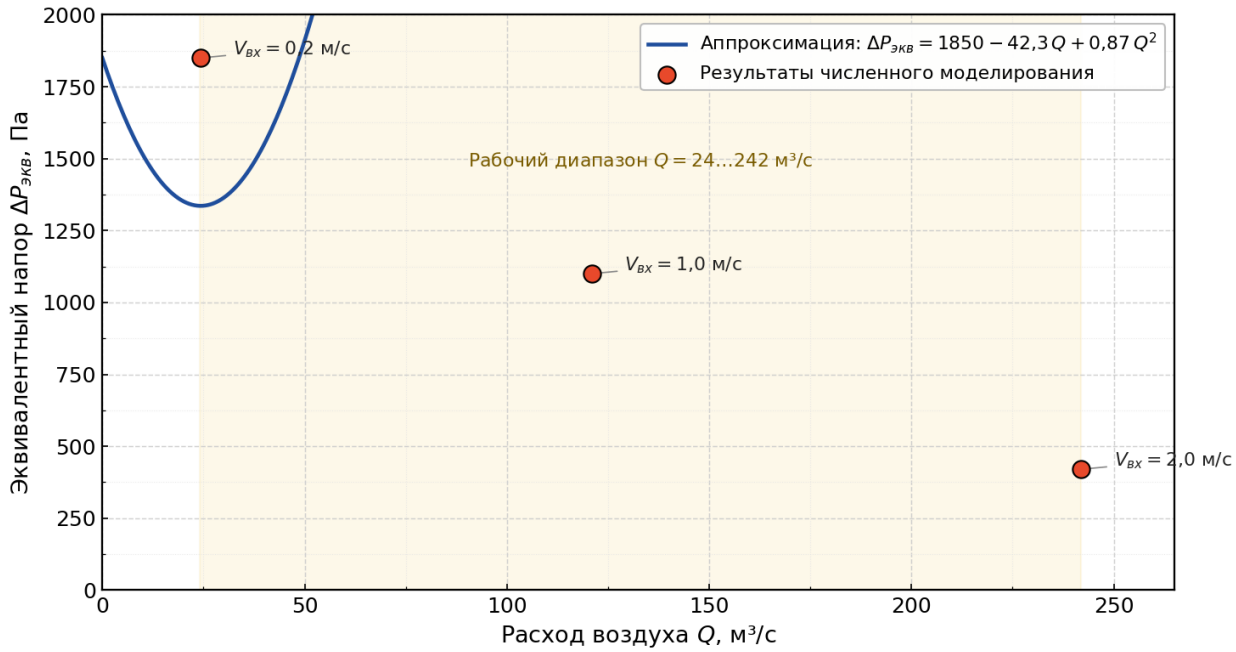

Рисунок 4. Эквивалентная напорная характеристика вентиляционно-эжекторной установки $\Delta P_{экв}$ = f(Q), полученная по результатам численного моделирования (точки — результаты расчётов при $V_{вх}$ = 0,2; 1,0; 2,0 м/с; линия — аппроксимация полиномом второй степени)

Численные исследования показали, что расположение эжекторной установки, наличие камеры смешения и её положение относительно вентилятора существенно влияют на аэродинамическую эффективность системы.

Заключение

Камеру смешения целесообразно размещать на расстоянии 0–1 м от выходного сечения вентилятора. Такое расположение обеспечивает эффективное использование кинетической энергии первичного воздушного потока и повышает аэродинамический напор эжекторной установки. При принятых параметрах зона существенного влияния эжекторного потока в горной выработке составляет около 150 м, в пределах которых он заметно воздействует на поле скоростей и воздухораспределение. В схеме без камеры смешения напор установки снижается примерно на 10 % по сравнению с вариантом, оснащённым камерой. Наиболее эффективным является размещение эжекторной установки в центральной части поперечного сечения горной выработки, что позволяет увеличить аэродинамический напор до 35 %. При размещении установки в средней части почвы выработки напор возрастает до 20 %. Таким образом, центральное расположение является наиболее рациональным с аэродинамической точки зрения. Разработанная процедура осреднения трёхмерных полей позволяет получить эквивалентную напорную характеристику эжекторной установки в виде зависимости $\Delta P = f(Q)$, которая может быть использована в одномерных расчётах шахтных вентиляционных сетей. Адекватность полученной характеристики подтверждается согласованием с результатами предыдущих исследований и данными натурных измерений.

Список литературы

1. Алыменко Д.Н. Работа вентиляционной установки комбинированного типа в рудничной вентиляционной сети: дисс. … канд. техн. наук. – Пермь. – 1999. – 159 с.
2. Алыменко Д.Н., Иванов А.А. Моделирование вентиляторной эжекторной установки // Актуальные проблемы военно-научных исследований. – 2025. – № 2 (34).
3. Алыменко Д.Н., Иванов А.А. Метод расчета числа Рейнольдса потоков воздуха при эжекционном процессе // Актуальные проблемы военно-научных исследований. – 2025. – № 1 (33).
4. Казаков Б.П., Шалимов А.В., Гришин Е.Л. Эжектирование возвратного потока воздуха для увеличения дальнобойности направленной в тупик воздушной струи // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333. – С. 27–36.
5. Кобылкин С.С. Обоснование метода расчёта параметров вентиляции шахт на основе объёмного моделирования аэрогазодинамических процессов: дисс. … канд. техн. наук. – Москва. – 2011. – 161 с.
6. Кобылкин С.С. Методологические основы системного проектирования вентиляции шахт: дисс. … д-ра техн. наук. – Москва: НИТУ МИСИС, 2018.
7. Кобылкин С.С. Обоснование метода расчета параметров вентиляции шахт на основе объемного моделирования аэрогазодинамических процессов: автореферат дисс. … канд. техн. наук. – Москва, 2011. – 20 с.
8. Кобылкин С.С. Обоснование метода расчёта параметров вентиляции шахт на основе объёмного моделирования аэрогазодинамических процессов: дисс. … канд. техн. наук. – Москва. – 2011. – 161 с.

9. Левин Л.Ю., Суханов А.Е., Исаевич А.Г. Увеличение энергоэффективности систем вентиляции калийных рудников путем реализации последовательного проветривания камер служебного назначения // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2023. – С. 93–106.
10. Медведев И.И. Рудничная вентиляция: справочник / под ред. К.З. Ушакова. – 2-е изд. – Москва: Недра, 1988. – 440 с.
11. Паршаков О. и др. Комплексное исследование газовой обстановки рудников // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2023. – С. 5–29.
12. Равшанов А.А., Нурхонов Х.А., Низомов Т.Н., Эштилавов С.А. Анализ математических моделей процесса эжекции в подземных горных выработках на основе закона сохранения // Цифровые технологии в промышленности. – 2025. – Т. 3, № 3. – С. 99–102.
13. Равшанов А.А., Нурхонов Х.А., Низомов Т.Н., Эштилавов С.А. Анализ математических моделей процесса эжекции // Цифровые технологии в промышленности. – 2025. – Т. 3, № 3. – С. 99–102.
14. Руководство по проектированию вентиляции угольных шахт. – Макеевка-Донбасс. – Макеевка-Донбасс. – 1989.
15. Сафин Р.Г., Сотников В.Г. Совершенствование методов расчета эквивалентного напора эжекторных установок в горных выработках большого сечения // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – С. 185–195.
16. Семин М.А. Научные основы комплексного обеспечения безопасности при строительстве шахтных стволов с применением способа искусственного замораживания пород: дис.… д-ра техн. наук. – 2022.
17. Akbarnejad S., Ziabasharhagh M. Development of a Theoretical Model for Predicting Performance of a Gas Ejector in Different Boundary Conditions and Working Fluids // Thermal Engineering. – 2025. – Т. 72. – P. 8–16.
18. Kumar A. et al. A comprehensive exploration of ejector design, operational factors, performance metrics, and practical applications // Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. – 2024. – Т. 46.
19. Shi D. et al. Experimental study on tail cavity flow and motion characteristics of continuous water exit of adjacent vehicles // Ocean Engineering. – 2026. – Т. 361.
20. Siddiqui M.A.H. et al. Maximizing energy savings in coal mines industrial ventilation: strategies and analysis for power reduction // Discover Applied Sciences. – 2025. – Т. 7.
21. Zheng L. et al. Modelling, optimization, and experimental studies of refrigeration CO2 ejectors: A review // Mathematics. – 2022. – Т. 10.

References

1. Alymenko D.N. [Operation of a combined-type ventilation unit in a mine ventilation network: dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences]. – Perm'. – 159 s. – 1999. (In Russ.).

2. Alymenko D.N., Ivanov A.A. [Modeling of a fan ejector unit] // Aktual'nye problemy voenno-nauchnykh issledovanij. – 2025. – No. 2 (34). (In Russ.).
3. Alymenko D.N., Ivanov A.A. [Method for calculating the Reynolds number of air flows during the ejection process] // Aktual'nye problemy voenno-nauchnykh issledovanij. – 2025. – No. 1 (33). (In Russ.).
4. Kazakov B.P., Shalimov A.V., Grishin E.L. [Ejection of the return air flow to increase the throw range of an air jet directed into a dead end] // Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov. – 2022. – Vol. 333. (In Russ.).
5. Kobylkin S.S. [Substantiation of a method for calculating mine ventilation parameters based on three-dimensional modeling of aerogasdynamic processes: dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences]. – Moskva. – 161 s. – 2011. (In Russ.).
6. Kobylkin S.S. [Methodological foundations of system design of mine ventilation: dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences]. – Moskva: NITU MISIS, 2018 (In Russ.).
7. Kobylkin S.S. [Substantiation of a method for calculating mine ventilation parameters based on three-dimensional modeling of aerogasdynamic processes: author's abstract of dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences]. – Moskva, 2011. – 20 s (In Russ.).
8. Kobylkin S.S. [Substantiation of a method for calculating mine ventilation parameters based on three-dimensional modeling of aerogasdynamic processes: dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences]. – Moskva. – 161 s. – 2011. (In Russ.).
9. Levin L.Yu., Sukhanov A.E., Isaevich A.G. [Increasing the energy efficiency of ventilation systems in potash mines by implementing sequential ventilation of service chambers] // Gornyj informatsionno-analiticheskij byulleten' (nauchno-tekhnicheskij zhurnal). – 2023. (In Russ.).
10. Medvedev I.I. [Mine ventilation: a reference book] / pod red. K.Z. Ushakova. – 2-e izd. – Moskva: Nedra, 1988. – 440 s (In Russ.).
11. [Comprehensive study of the gas conditions in mines] // Gornyj informatsionno-analiticheskij byulleten' (nauchno-tekhnicheskij zhurnal). – 2023. (In Russ.).
12. Ravshanov A.A., Nurkhonov Kh.A., Nizomov T.N., Eshtilavov S.A. [Analysis of mathematical models of the ejection process in underground mine workings based on the conservation law] // Tsifrovye tekhnologii v promyshlennosti. – 2025. – Vol. 3, No. 3. (In Russ.).
13. Ravshanov A.A., Nurkhonov Kh.A., Nizomov T.N., Eshtilavov S.A. [Analysis of mathematical models of the ejection process] // Tsifrovye tekhnologii v promyshlennosti. – 2025. – Vol. 3, No. 3. (In Russ.).
14. [Guide to designing the ventilation of coal mines]. – Makeevka-Donbass. – Makeevka-Donbass, 1989 (In Russ.).
15. Safin R.G., Sotnikov V.G. [Improvement of methods for calculating the equivalent head of ejector units in large-cross-section mine workings] // Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov. – 2024. – Vol. 335. (In Russ.).
16. Semin M.A. [Scientific foundations of comprehensive safety assurance in the construction of mine shafts using artificial rock freezing: dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences]. – 2022. (In Russ.).

17. Akbarnejad S., Ziabasharhagh M. Development of a Theoretical Model for Predicting Performance of a Gas Ejector in Different Boundary Conditions and Working Fluids // Thermal Engineering. – 2025. – Vol. 72. – P. 8–16.
18. Kumar A. et al. A comprehensive exploration of ejector design, operational factors, performance metrics, and practical applications // Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. – 2024. – Vol. 46.
19. Shi D. et al. Experimental study on tail cavity flow and motion characteristics of continuous water exit of adjacent vehicles // Ocean Engineering. – 2026. – Vol. 361.
20. Siddiqui M.A.H. et al. Maximizing energy savings in coal mines industrial ventilation: strategies and analysis for power reduction // Discover Applied Sciences. – 2025. – Vol. 7.
21. Zheng L. et al. Modelling, optimization, and experimental studies of refrigeration CO2 ejectors: A review // Mathematics. – 2022. – Vol. 10.